

МАЛОЦИКЛОВАЯ ПРОЧНОСТЬ СИЛЬФОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Федоров В.А.

Уфимский Государственный Авиационный Технический Университет, г. Уфа

В связи с применением в современных отечественных двигательных установках горючего и окислителя в криогенном состоянии (например, ЖРД на кислородно-водородном топливе), возникла серьезная проблема обеспечения циклопрочности и гибкости многослойных сильфонных компенсаторов (МСК) трубопроводных систем в условиях низких температур. Под низкими (криогенными) температурами физике и криогенной технике понимают диапазон температур ниже 120К. Для решения задачи циклопрочности МСК существуют различные методики, которые используются в основном в условиях нормальных (комнатных или климатических) и высоких температур. Циклопрочность МСК в условиях низких температур является малоизученной областью. Наряду с этим в авиакосмической технике идет постоянная борьба за снижение веса конструкции (например, увеличение доли полезной нагрузки). Для изготовления МСК в основном используют нержавеющие стали. Вопрос об использовании в данных конструкциях более легких или дешевых материалов остается малоизученным.

Исходя из вышесказанного, были поставлены задачи изучить циклическую прочность МСК, слои которых выполнены из новых (еще не применяемых в данных конструкциях) или разнородных материалов, в условиях низких температур, создать методы расчета и разработать практические рекомендации по конструированию.

Для решения задачи о напряженно-деформированном состоянии (НДС) гофрированной оболочки при циклическом упруго-пластическом нагружении использовались работы Гусенкова А.П., Москвитина Г.В., Меерсона Б.М.

На основе зависимостей оценки малоциклового прочности конструкций при жестком нагружении определены основные уравнения для расчета МСК. Проанализированы основные зависимости Коффина, Мэнсона, Лэнджера, описывающие связь числа циклов до разрушения со значениями пластической или упругой деформации за цикл, и работы А.П. Гусенкова, В.П. Когаева и др. по расчету элементов конструкций на прочность при малом числе циклов нагружения.

Кроме того, проанализирована возможность применения в качестве материалов конструкции МСК новых материалов – алюминиевых сплавов (с точки зрения использования в данных конструкциях). На основе анализа работ П.Ф. Кошелева, И.Н. Фридляндера и механических свойств нержавеющей стали, жаропрочного сплава (применяемых как основные материалы в конструкции МСК) и алюминиевых сплавов при понижении температуры от 293К до 20К показано, что (см. рис. 1):

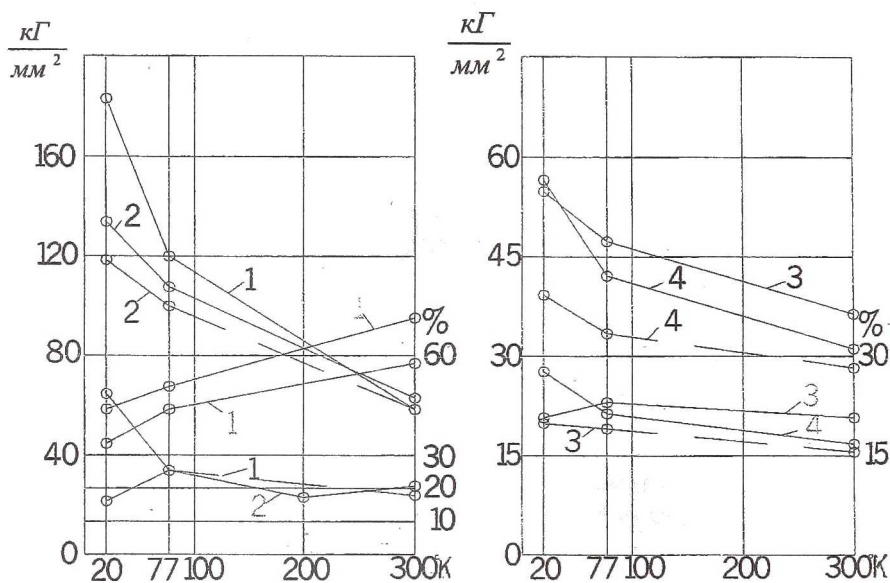


Рис.1. Зависимость механических свойств от температуры:

- 1- сталь Х18Н10Т (закалка с 1050°С в воду, толщиной 14 мм);
- 2- сплав ОТ4-1 (отжиг, лист толщиной 1,5 мм);
- 3- сплав АМг6 (отжиг при 325° лист толщиной 2,5 мм;
- 4- сплав АД33 (закаленный и искусственно состаренный).

— σ_e — $\sigma_{0.2}$ — δ — ψ

- наиболее пригодными для работы в условиях низких температур по сравнению со сталями и никелевыми сплавами, являются алюминиевые деформируемые сплавы;

при понижении температуры пластичность деформируемых алюминиевых сплавов остается практически стабильной при удовлетворительной прочности и выносливости, что позволяет их применить в конструкции МСК работающих в условиях пластических деформаций.

Методика расчета заключается в следующем. Для расчета используются уравнения, описывающие НДС и прочность силфона при циклическом упругопластическом нагружении.

Малоцикловое нагружение силфонов при изгибах происходит в жестком цикле нагружения. Для описания обобщенной циклической диаграммы деформирования использован обобщенный принцип Мазинга. В качестве критерия разрушения используется деформационно-кинетический критерий

$$d_{уст} + d_{ст} = 1,$$

где $d_{уст}$ - усталостное повреждение; $d_{ст}$ - квазистатическое повреждение.

В жестком цикле нагружения, характерном для работы гибких металлических рукавов, односторонне накопленная деформация практически отсутствует. Поэтому принимаем условие прочности в виде $d_{уст} < 1$. Кривая усталости аппроксимируется выражением типа Лэнджера

$$N_i(t) = \left(\frac{c(t)}{\varepsilon^{(k)}_{u\max} - \frac{\sigma_{-1}(t)}{E(t)}} \right)^2,$$

где $c(t) = 0.5 \times \ln \left(\frac{1}{1 - \psi(t)} \right)$; $\psi(t)$ – коэффициент поперечного сужения

гладкого образца; $E(t)$ – модуль упругости; $\sigma_{-1}(t)$ – предел выносливости гладкого образца; $\varepsilon^{(k)}_{u\max}$ – максимальное значение интенсивности деформаций в k -ом полупероде нагружения; t – температура нагружения.

Для корреляции гладкого образца в тонкостенную оболочку силфона используется коэффициент $k=1,5$. Таким образом

$$c(t) = 0.5 \times \ln \left(\frac{1}{1 - \psi_1(t)} \right),$$

где $\psi_1(t) = \psi(t) \times k$.

Для определения значения ψ используются диаграмма $\psi = f(p(t))$, где $p(t)$ - параметр Ларсена-Миллера.

$$P = (273 + t)(s + lgt),$$

где τ – время выдержки; S – коэффициент, $S = 7.12$; t – температура по шкале Цельсия.

Диаграмма $\psi = f(p(t))$ строится на основе испытаний образцов на длительную статическую прочность. При расчете долговечности, используя

найденное значение p (определяется по температуре), по диаграмме $\psi = f(p(t))$ определяется значение ψ .

Используется решение задачи теории оболочек для полуцикла нагружения.

В качестве первой группы разрешающих уравнений используются уравнения равновесия элемента оболочки.

Второй группой разрешающих уравнений являются соотношения связи перемещений и деформаций срединной поверхности оболочки.

При рассмотрении связи деформаций оболочки и ее срединной поверхности, а также связи напряжений и деформаций использованы гипотезы Кирхгофа-Лява. Из соотношений упругости в форме закона Гука в соответствии с теорией малых упруго-пластических деформаций используется третья группа разрешающих уравнений - выражения, связывающие внутренние усилия и деформации срединной поверхности

$$E \times A = B,$$

где E – матрица коэффициентов; A – матрица деформаций; B – матрица усилий.

Для соотношения связи напряжений и деформаций за пределами упругости использован метод переменных параметров упругости И.А. Биргера (МППУ).

Вышеописанные три группы разрешающих уравнений в частных производных образуют замкнутую систему восьми обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка в полных производных для случая винтообразной оболочки

$$\frac{dY}{dS} = D \times Y + F,$$

где Y – вектор неизвестных; D – матрица коэффициентов; F – вектор температурных и распределенных силовых нагрузок.

Для случая расчета сильфонов с кольцевыми гофрами используется система шести уравнений.

Для определения перемещений сильфона при качании, перемещения от изгиба приводятся к эквивалентным перемещениям от растяжения-сжатия.

Долговечность всего сильфона определяется по долговечности слоя с наименьшими значениями числа циклов до разрушения.

На основе зависимостей, описывающих НДС МСК, и уравнений малоциклового прочностных конструкций были рассчитаны количество циклов до разрушения различных типоразмеров сильфонов с различным сочетанием геометрии и материалов слоев для различных условий нагружения.

Механические характеристики материалов: модуль упругости E , предел выносливости σ_{-1} , коэффициент линейного расширения α ,

коэффициент Пуассона μ и другие выбираются для соответствующих температур эксплуатации.

Расчеты проводились с помощью методик, описанных в работах Гусенкова А.П. и др. и программных продуктов разработанных в НИЛ по гибким трубопроводным системам Уфимского государственного авиационного технического университета.

Расчеты, проведенные автором, показали, что (см. табл. 1):

Таблица 1

Число циклов до разрушения сиффона

слой сиффона	механические свойства		число циклов N, циклов
	материал	температура, К	
сиффон Ду92			
внутренний	АМг6	293К	833869
		77К	4303715
наружный	АМг6	293К	402028
		77К	2451176
	Х18Н10Т	293К	83625
		77К	118797
сиффон Ду56			
внутренний	АМг6	293К	45326588
		20К	12680071
наружный	АМг6	293К	24942760
		20К	4490013
	Х18Н10Т	293К	271668
		20К	180854
сиффон Ду36			
внутренний	АМг6	293К	10558
		24К	32324
наружный	АМг6	293К	21501
		24К	127219

1. Слой сиффона, выполненный из алюминиевого сплава или стали, обладает хорошей циклопрочностью, при достаточной прочности и выносливости.
2. С понижением температуры циклическая прочность сиффонов увеличивается.
3. При одной и той же температуре, например 77К, и одинаковых перемещениях торцев слой сиффона, выполненный из алюминиевого сплава АМг6, обладает большей циклопрочностью, чем тот же слой сиффона, выполненный из нержавеющей стали Х18Н10Т.